

## 対物レンズ

## Objective

### BACKGROUND OF THE INVENTION

#### 1. Field of the Invention

本発明は、顕微鏡対物レンズに関し、特に、波長250nm近辺の深紫外領域で用いられる、高NA、高倍の無限遠補正型対物レンズに関するものである。

#### 2. Description of the Related Art

波長250nm近辺の深紫外領域（D U V 域）で用いられる対物レンズとしては、大きく分けて3つのタイプが知られている。第1のタイプは、同一の媒質（多くの場合、石英）で形成された複数のレンズだけで構成されたものであって、原理的には色収差の補正ができないものである（例えば、特開平6-242381号及び特開平10-104510号参照）。第2のタイプは、異なる媒質（多くの場合、石英と蛍石）で形成されたレンズを接合剤で接合するようにしたものであって、色収差の補正ができるようにしたものである（例えば、特開平5-72482号、特開平9-243923号、特開平11-249025号及び特開2001-42224号参照）。また、第3のタイプは、石英で形成されたレンズと蛍石で形成されたレンズを用いて色収差を補正するにはしているが、両者を接合剤によって接合してはいないものである（例えば、特開平11-167067号及び特開2001-318317号参照）。

顕微鏡の分解能は、基本的には、波長と対物レンズの開口数とで決まるが、通常の顕微鏡で用いている可視光の中心波長は550nm前後であり、乾燥系対物レンズの最大開口数は0.9程度である。そのため、使用波長を250nm近辺にすると、波長が半分であるために分解能は約2倍となるが、それはあくまでも開口数が同じ場合のことである。使用波長を250nm付近にしたとしても、開口数が0.4程度では、波長が約半分であって且つ開口数も半分であることから、相殺されてしまい、分解能としては、従来の顕微鏡と何ら変わることがないこと

になってしまう。

## SUMMARY OF THE INVENTION

本発明による対物レンズは、すべてのレンズが単レンズで構成されていて、像側から順に配置された、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズと少なくとも各 2 枚の負レンズと正レンズを有し全体として負のパワーを持つ第 1 レンズ群と、負レンズと正レンズで構成されていて負レンズの曲率半径は正レンズと隣接する側がその反対側よりも小さい第 2 レンズ群と、媒質の異なる両凸正レンズと両凹負レンズからなり且つ物体側及び像側に前記両凸正レンズが配置され全体として正のパワーを持つ第 3 レンズ群と、負メニスカスレンズと少なくとも 1 枚の正メニスカスレンズを有する全体として正のパワーを持つ第 4 レンズ群とで構成された開口数が 0.7 以上の対物レンズであって、前記第 2 レンズ群中の負レンズにおいて、隣接する正レンズ側の曲率半径を  $R_{\min}$ 、正レンズと反対側の曲率半径を  $R_{\max}$  としたとき、下記の条件 (1) を満足することを特徴としている。

$$0 < |R_{\min}/R_{\max}| < 0.5 \quad (1)$$

本発明によれば、好ましくは、上記対物レンズにおける第 2 レンズ群の焦点距離を  $FL2(mm)$ 、第 3 レンズ群の焦点距離を  $FL3(mm)$  としたとき、下記の条件 (2) を満足する。

$$1 < |FL2/FL3| \quad (2)$$

また、本発明によれば、好ましくは、上記対物レンズの第 1 レンズ群の焦点距離を  $FL1(mm)$ 、第 2 レンズ群から第 4 レンズ群までの合成焦点距離を  $FL234(mm)$  としたとき、下記の条件 (3) を満足する。

$$-15 < FL1/FL234 < -1 \quad (3)$$

また、本発明によれば、好ましくは、上記第 1、第 3 及び第 4 レンズ群は、媒質の異なる正レンズと負レンズとの間に空気間隔を設け、且つ対物レンズの同焦点距離を  $L(mm)$ 、空気間隔を  $d(mm)$ 、該空気間隔を挟んで向かい合う正パワーの面の曲率半径を  $R_p$ 、負パワーの面の曲率半径を  $R_n$  としたとき、下記の条件 (4) 及び (5) を満足する。なお、この条件式における  $L$  は、対物レンズの全長と定義しているが、対物レンズの同焦点距離が対物レンズの全長と略等しい場合は、 $L$

として対物レンズの同焦距離を用いても良い。ここで、対物レンズの全長とは、第1レンズ面から最終レンズ面までの距離である。

$$d/L < 0.025 \quad (4)$$

$$0.58 < R_p/R_n < 1.73 \quad (5)$$

また、本発明によれば、好ましくは、対物レンズに用いる硝材は石英と蛍石である。

また、本発明によれば、好ましくは、第3レンズ群の媒質の異なる負レンズと正レンズを空気間隔をもって配置することにより構成された少なくとも一つのレンズ対は、負レンズが石英、正レンズが蛍石で構成されている。

また、本発明によれば、好ましくは、第1レンズ群の、少なくとも1枚の負レンズの、像側の曲率半径を $R_i$ 、物体側の曲率半径 $R_o$ としたとき、下記の条件(6)を満足する。

$$R_i < R_o \quad (6)$$

また、本発明によれば、好ましくは、深紫外域での物体側結像位置を $DUV_{fp}$ 、赤外域の波長の物体結像位置を $IR_{fp}$ としたとき、下記の条件(7)を満足する。

$$| DUV_{fp} - IR_{fp} | \leq 12 \mu m \quad (7)$$

These and other advantages and features of the present invention will become apparent from the following detailed description when taken in conjunction with the accompanying drawings.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

図1は第1実施例のレンズ構成図である。

図2は第1実施例の収差図である。

図3は第2実施例のレンズ構成図である。

図4は第2実施例の収差図である。

図5は第3実施例のレンズ構成図である。

図6は第3実施例の収差図である。

図7は第4実施例のレンズ構成図である。

図 8 は第 4 実施例の収差図である。

図 9 は第 5 実施例のレンズ構成図である。

図 10 は第 5 実施例の収差図である。

図 11 は第 6 実施例のレンズ構成図である。

図 12 は第 6 実施例の収差図である。

図 13 は A F 装置を備えた通常の顕微鏡の概略構成図である。

#### DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

以下、本発明の実施例の説明に先立ち、本発明の作用効果について記述する。

本発明の対物レンズは、媒質の異なるレンズを接合剤で接合するようなことはせず、全て単レンズで構成されている。そして、本発明によれば、色収差を補正できるとともに、接合剤を用いた場合における問題点をクリアでき、しかも 250 nm 近辺の波長と高開口数に見合った分解能も得ることが可能である。更に赤外光を使ったアクティブ A F が可能となることで操作性が良く、製造誤差にも強い深紫外顕微鏡を提供することができる。

本発明の第 1 レンズ群は、像側から順に、像側に凸を向けた正メニスカスレンズと少なくとも各 2 枚の負レンズと正レンズで構成され、全体として負のパワーを持っている。そして、第 1 レンズ群の中に、強い負パワーのレンズを設けて、像側に出射する光線を平行光にする作用をもたせると共に、軸外収差である像面湾曲やコマ収差を補正している。また、単純に負パワーのレンズだけを配したのでは諸収差のバランスがとれなくなるため、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズと、強い負パワーを持った両凹の負レンズを配することにより、ガウス面を設け、全体としてバランスよく像面湾曲や倍率色収差の補正を行えるようにしている。また、媒質の異なる負レンズと正レンズを空気間隔をもって配置することにより構成されたレンズ対を少なくとも 1 組有する構成をとることで、第 2 ～第 4 レンズ群で補正しきれなかった色収差を含む軸上および軸外の諸収差の補正を行えるようにしている。

また、第 2 レンズ群は、負レンズと正レンズで構成され、負レンズの曲率半径は同じ群内で隣接する正レンズ側が該正レンズと反対側の曲率半径に比べ小さい

ことを特徴としている。これは、第3レンズ群、第4レンズ群で発生する球面収差とコマ収差に対し逆方向の球面収差とコマ収差を発生させて打ち消し合う作用を持たせるためである。特に正レンズに隣接する負レンズの曲率半径を小さくすることで、第3レンズ群、第4レンズ群と逆方向の球面収差が発生しやすく、上記作用が可能となる。また、条件式(1)はこの収差を補正する条件であり、上限である0.5を上回ると収差補正の効果が薄まり、第3レンズ群、第4レンズ群で発生した球面収差を補正しきれなくなってしまう。

また、第3レンズ群は、媒質の異なる両凸正レンズと両凹負レンズからなり、物体側及び像側に前記両凸正レンズが配置され、全体として正のパワーを持つことを特徴としている。標本面から出射する光は、第4レンズ群を通過する際マージナル光線が広がって第3レンズ群に入射するが、この第3レンズ群に負のパワーを配置すると光線は更に広がり、光線の高さ(光軸に対するマージナル光線のY方向の幅)が非常に大きくなってしまう。これは、レンズの外径が大きくなって製造原価が高くなるという問題点が生じることと、レンズの製造誤差によって性能が劣化しやすいということを意味する。よって、本発明では、第3レンズ群を全体として正パワーとし、更に物体側と像側双方に両凸レンズを配置することによって、第4レンズ群から射出されるマージナル光線の光線高を低くすることを可能にしている。光線高を低くできるということは、レンズ外径が小さくても良いということであるから、製造誤差やレンズ形状の変化に対しても性能を維持できるような構成となる。更に、媒質の異なる負レンズと正レンズを配置することにより、 $248\text{nm} \pm \text{数nm}$ におけるDUV波長域の色収差とアクティブAFに用いられるNIR(近赤外)域の軸上色収差を補正することが可能となる。

また、第4レンズ群は、負メニスカスレンズと少なくとも1枚の正メニスカスレンズを有する全体として正のパワーを持つことを特徴としている。これは負メニスカスレンズが存在することで、第4レンズ群中の正レンズで発生する球面収差を補正する効果がある。また、少なくとも1枚の正メニスカスレンズを有する全体として正のパワーを持つことにより、主に、単色収差を良好に補正することができる。開口数が0.7以上、特に0.9クラスの対物レンズになると、物体

から出た光線の角度を小さくしないと、単色収差すら補正できなくなるが、少なくとも1枚の正メニスカスレンズを用いて光線の角度を徐々に小さくすることによって、それが可能になる。

また、条件式(2)は、第2レンズ群と第3レンズ群の焦点距離の比率を表しており、下限である1を下回ると、第2レンズ群に比べ第3レンズ群の焦点距離が大きくなってしまう。この場合、第3レンズ群での光線高が高くなってしまい、レンズ外径が大きくなり、第3レンズ群の収差補正係数が大きくなり製造誤差の影響を受けやすくなるという問題が起きる。

また、条件式(3)は、第1レンズ群と第2～第4レンズ群の焦点距離の比率を表しており、下限である-15を下回ると、軸外収差補正に寄与する第1レンズ群の焦点距離が大きくなりすぎるため、つまり負パワーが弱くなりすぎるため、コマ収差や像面湾曲の補正が困難になる。また、上限値である-1を上回ると、第1レンズ群の焦点距離が小さくなりすぎるため、つまり負パワーが強くなりすぎるため、第2～第4レンズ群の焦点距離が大きくなりすぎ、正パワーが弱まる。その結果、第2～第4レンズ群での光線高が高くなることから、各レンズ群での収差発生量が増えてしまう。

また、第1、第3及び第4レンズ群は、媒質の異なる負レンズと正レンズを配置することにより構成されている。本発明の対物レンズは、 $248\text{ nm} \pm \text{数 nm}$ で性能を発揮することを前提としており、第1レンズ群は倍率の色収差補正、第3レンズ群、第4レンズ群では軸上の色収差補正を可能にしている。

また、条件式(4)はレンズ同士を近接して配置させるための条件であるが、この条件の上限である0.025を上回ると、レンズ間の空気間隔が広くなりすぎ、良好な色収差の補正ができなくなってしまう。更に条件式(5)は、請求項1で定義されているレンズ対(以下、単にレンズ対という)の向かい合わされた各面の曲率半径をほぼ同じにするための条件であって、それを満足させれば、色収差を含む諸収差を好適に補正することが可能となる。なお、この条件範囲を超えてしまうと、特に色収差の補正が困難になってしまう。このことから、上記の条件式(4)及び(5)は、接合剤を用いなくても、擬似的に、接合レンズを用

いた場合と同じ役割をさせ、球面収差や色収差を補正するための条件となる。

また、上記対物レンズにおいて、各レンズに用いる硝材を石英と蛍石にすることにより、潮解性や複屈折性のある媒質を用いていなくても、250 nm 近辺の深紫外領域用の対物レンズとして、製造性・耐性がよく、透過率の高いものが得られる。

また、上記対物レンズにおいて、第1レンズ群と、第3レンズ群と、第4レンズ群の媒質の異なる負レンズと正レンズを空気間隔をもって配置することにより構成された少なくとも一つのレンズ対の、負レンズを石英、正レンズを蛍石で構成することで、第1レンズ群では主に倍率色収差、第3及び第4レンズ群では軸上色収差を含む諸収差をより良好に補正することができる。

また、上記対物レンズにおいて、第1レンズ群の、少なくとも1枚の負レンズにおいて、像側の曲率半径を  $R_i$ 、物体側の曲率半径  $R_o$  としたとき、条件式(6)を満足させるようにすると、凸レンズと凹レンズに入射する光線を好適に曲げることができる。

また、条件式(7)は物体側において、深紫外域(248 ± 5 nm)と近赤外域(主に半導体レーザでAFに用いられる波長は670 ~ 900 nmの単波長である)の結像位置のズレ量を示す条件である。物体から出た光線は、ある開口数で対物レンズに入射し、対物レンズから平行光となり、結像レンズによって結像される。通常、顕微鏡用のAFの場合、図13に示すように、対物レンズと結像レンズの間に、近赤外光のみを反射するダイクロイックミラーDMが光軸に対し45°の角度で配置されている。対物レンズから出た可視光はダイクロイックミラーDMを通過し、観察側の結像レンズによって結像する。また、近赤外光はダイクロイックミラーDMで反射し、AF用結像レンズで結像される。観察側とAF側の結像位置が合っていれば、物体側の結像位置も同じであることから、近赤外光によるAFが可能となる。しかし、実際には、対物レンズにはある程度の軸上の色収差が存在する。この場合、観察側の結像位置は変えられないが、AF側の結像位置は所定の結像位置に導くよう、AF用結像レンズが光軸方向に、ある程度移動可能な構成を備えている。例えば、焦点距離1.8 mmの対物レンズと

焦点距離 180 mm の結像レンズを用いると、100 倍対物レンズとなる。基本的に AF 用結像レンズの焦点距離は、観察側における結像レンズの焦点距離の  $1/2 \sim 1/4$  に設定されていることが多い。その理由は、観察側の結像レンズと同じ焦点距離では AF 用結像レンズの移動量が多すぎるためである。

例えば、焦点距離 1.8 mm の 100 倍対物レンズと、180 mm の AF 用結像レンズを用いたとすると、物体側における可視光と近赤外光の結像位置ズレが  $\pm 5 \mu\text{m}$  であった場合、AF 側のズレ量は縦倍率から、

$$\pm 0.005 \text{ (mm)} \times 100 \text{ (倍)} \times 100 \text{ (倍)} = \pm 50 \text{ mm}$$

にもなる。これでは、スペースやレンズ駆動モーターなどの問題から、上記ズレ量を実現することは無理である。そこで、AF 用結像レンズの焦点距離を観察側における結像レンズの焦点距離の  $1/2 \sim 1/4$  にし、例えば、焦点距離が  $1/2$  の 90 mm であれば、

$$\pm 0.005 \text{ (mm)} \times 50 \text{ (倍)} \times 50 \text{ (倍)} = \pm 12.5 \text{ mm}$$

と AF 側の結像位置のズレは  $1/4$  となる。可視光線を中心とした通常の対物レンズであれば、波長の差が比較的小さく、物体側における可視光と近赤外光のズレは少ないため、AF 用結像レンズの移動量も少なくすむ。しかしながら、本発明の深紫外域用の対物レンズは 250 nm 近辺の波長を基準としているので、近赤外光の波長との差は倍以上になってしまう。条件式 (7) は、上記問題を解決するための条件であり、この条件式の上限を上回ると、AF 用結像レンズの移動量が大きくなりすぎて、AF 用結像レンズでズレを補正しきれなくなってしまう。

以下、本発明の実施例を、図 1 ～ 12 を用いて説明する。本発明の実施例は全て、焦点距離 1.8 mm、深紫外域での補正波長領域  $248 \pm 5 \text{ nm}$  であり、焦点距離 180 mm の結像レンズと組み合わせた時、視野数  $\phi 5 \text{ mm}$ 、倍率 100 倍となるものである。波長領域  $248 \pm 5 \text{ nm}$  の範囲で色収差を補正してあるため、狭帯域化していない KrF エキシマレーザと組み合わせた使用が可能であり、接合剤を用いていないため、高エネルギーのレーザに対しても十分な耐性がある。なお、半値全幅 7 nm 程度のバンドパスフィルタと組み合わせれば、レーザ照射の前段階として、標本を



水銀ランプ等で照明し観察することも可能である。また、深紫外域と赤外域の物体側での結像ズレを抑えたことにより、AFが可能である。

なお、全実施例において、収差図で表されている収差は、対物レンズ単体を逆追跡した時の物体面でのものであり、単位はmm及び%である。球面収差に関しては、点線が248nm、一点鎖線が243nm、実線が253nmを表している

## 第1実施例

第1実施例のレンズ構成は図1に示され、各収差は図2に示されている。図1から明かなように、本実施例の第1レンズ群G1は、像側から順に配置された、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL1と、負レンズL2と、正レンズL3と、負レンズL4と、正レンズL5で構成され、隣接する3枚のレンズL3～L5で2組のレンズ対P1、P2を形成して擬似的な3枚接合レンズを構成し、全体として負のパワーをもっている。

また、第2レンズ群G2は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL6と両凸の正レンズL7で構成されており、負レンズL6の曲率半径は、同じ群内で隣接する正レンズL7側がその反対側に比べて小さくなるように選定されている。

また、第3レンズ群G3は、媒質の異なる両凸正レンズと両凹負レンズを交互に配置してなる、4枚の両凸正レンズL8、L10、L12及びL14と、3枚の両凹負レンズL9、L11及びL13で構成され、物体側及び像側に両凸正レンズL8、L14が配置されている。更に、隣接するこれら7枚のレンズL8～L14で、6組のレンズ対P3、P4、P5、P6、P7及びP8を形成して擬似的な3枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーを持っている。

また、第4レンズ群G4は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL15と、両凸の正レンズL16と、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL17とL18で構成され、レンズL15及びL16は1組のレンズ対P9を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、下記のデータ1から明かなように、本実施例は、条件(1)、(2)、(3)及び(6)を、レンズ対P1～P9が条件(4)、(5)を、また、深紫

外域と赤外域の物体側の波面収差結像位置も条件（7）を夫々満足している。

# データ1

同焦45mm

深紫外域での収差補正範囲：248nm±5nm

NA0.9

WD=0.2

面番号	R D Y	T H I	媒質				
1	INFINITY	-4			条件 (4)	条件 (5)	
2	2.48717	2.473969	石英	L1			
3	2.70108	1					
4	-2.27772	1.490233	石英	L2			
5	2.67967	3.214262					
6	-15.64714	3.982066	蛍石	L3			
7	-3.66338	0.434784			P1	0.0097	1.127
8	-3.25138	1.341504	石英	L4			
9	228.14528	0.232865			P2	0.0052	0.633
10	144.4742	2.659426	蛍石	L5			
11	-6.35714	0.1					
12	56.51823	1	石英	L6			
13	9.57308	0.703382					
14	18.84184	2.359018	蛍石	L7			
15	-15.54698	0.1					
16	11.87056	3.506388	蛍石	L8			
17	-11.87056	0.131926			P3	0.0029	0.957
18	-12.39959	1	石英	L9			
19	9.49874	0.1			P4	0.0022	0.775

20	7.36111	4.249929	萤石	L10			
21	-10.45746	0.47826			P5	0.0106	1.291
22	-8.10095	1	石英	L11			
23	8.10095	0.1			P6	0.0022	0.976
24	7.90936	3.821471	萤石	L12			
25	-7.90936	0.2			P7	0.0044	1.013
26	-7.80576	0.96	石英	L13			
27	7.80576	0.311743			P8	0.0069	1.140
28	8.89943	3.449933	萤石	L14			
29	-7.92049	0.1					
30	9.15314	1	石英	L15			
31	3.68027	0.64784			P9	0.0144	1.286
32	4.7319	2.751027	萤石	L16			
33	-15.69583	0.1					
34	3.66954	1.798802	萤石	L17			
35	7.20788	0.1					
36	1.8327	1.853224	石英	L18			
37	15.44227	0.247948					

FL1 = -14.122

FL2 = 74.671

FL3 = 18.602

FL234 = 11.767

Rmin = 9.57308

Rmax = 18.84184

AF使用波長	248nmと各AF使用波長との物体側における波面収差ベスト位置での結像ズレ
670nm	+4.60 $\mu\text{m}$
785nm	+0.19 $\mu\text{m}$
900nm	-5.64 $\mu\text{m}$

## 第2実施例

第2実施例のレンズ構成は図3に示され、各収差は図4に示されている。図3から明かなように、本実施例の第1レンズ群G1は、像側から順に配置された、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL1と、負レンズL2と、正レンズL3と、負レンズL4と、正レンズL5とで構成され、隣接する3枚のレンズL3～L5で2組のレンズ対P1及びP2を構成して、擬似的な3枚接合レンズを構成し、全体として負のパワーをもっている。

また、第2レンズ群G2は、両凹負レンズL6と両凸正レンズL7で構成されており、負レンズL6の曲率半径は、同じ群内で隣接する正レンズL7側がその反対側に比べて小さくなるように選定されている。

また、第3レンズ群G3は、媒質の異なる両凸正レンズと両凹負レンズを交互に配置してなる、4枚の両凸正レンズL8、L10、L12及びL14と、3枚の両凹レンズL9、L11及びL13で構成され、物体側及び像側に両凸正レンズL8及びL14が配置されている。更に隣接する2枚のレンズL8とL9で1組のレンズ対P3を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、また、5枚のレンズL5～L14で4組のレンズ対P4、P5、P6及びP7を形成して擬似的な3枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、第4レンズ群G4は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL15と、両凸レンズL16と、像側に凸面を向けた正のメニスカスレンズL17とL18で構成され、隣接する2枚のレンズL15とL16で1組のレンズ対P8を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、次のデータ2から明かなように、本実施例は、条件(1)、(2)、(3)及び(6)を、レンズ対P1～P8が条件(4)及び(5)を、また、深紫

外域と赤外域の物体側の波面収差結像位置も条件（7）をそれぞれ満足している。

## データ 2

同焦45mm

深紫外域での収差補正範囲：248nm±5nm

NA0.9

WD=0.2

面番号	R D Y	T H I	媒質				
1	INFINITY	-4				条件 (4)	条件 (5)
2	2.7384	3.051628	石英	L1			
3	2.53121	1					
4	-2.1847	1.047705	石英	L2			
5	2.86499	4.886075					
6	56.70556	2.334353	蛍石	L3			
7	-3.99727	0.495399			P1	0.0110	1.186
8	-3.37138	1	石英	L4			
9	-48.98121	0.280628			P2	0.0062	0.835
10	-40.90839	2.734155	蛍石	L5			
11	-5.36137	0.1					
12	-112.9024	1	石英	L6			
13	8.7118	0.977655					
14	44.19142	2.184896	蛍石	L7			
15	-12.32926	0.1					
16	15.55116	3.305937	蛍石	L8			
17	-9.72897	0.320949			P3	0.0071	1.116
18	-8.71964	1	石英	L9			

19	24.0111	0.1					
20	8.64398	4.054088	萤石	L10			
21	-10.49908	0.297857			P4	0.0066	1.105
22	-9.50178	1	石英	L11			
23	7.11952	0.209897			P5	0.0047	1.027
24	7.31004	3.925088	萤石	L12			
25	-8.00503	0.200654			P6	0.0045	1.040
26	-7.70025	0.96	石英	L13			
27	7.18457	0.376765			P7	0.0084	1.180
28	8.47627	3.566291	萤石	L14			
29	-7.54149	0.1					
30	8.54606	1	石英	L15			
31	3.58988	0.685352			P8	0.0152	1.320
32	4.73777	2.692071	萤石	L16			
33	-15.80256	0.1					
34	3.77816	1.763192	萤石	L17			
35	8.04338	0.1					
36	1.86328	1.807165	石英	L18			
37	54.41499	0.242201					

FL1=-50

FL2=-118.549

FL3= 17.046

FL234=-9.710

Rmin= 8.7118

Rmax= 44.19142

AF使用波長	248nmと各AF使用波長との物体側における波面収差ベスト位置での結像ズレ
670nm	+4.04 $\mu\text{m}$
785nm	+0.35 $\mu\text{m}$
900nm	-6.14 $\mu\text{m}$

### 第3実施例

第3実施例のレンズ構成は図5に示され、各収差は図6に示されている。図5から明かなように、本実施例の第1レンズ群G1は、像側から順に配置された、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL1と、負レンズL2と、正レンズL3と、負レンズL4と、正レンズL5で構成され、隣接する2枚のレンズL3とL4で1組のレンズ対P1を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、全体として負のパワーをもっている。

また、第2レンズ群G2は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL6と、両凸の正レンズL7と、物体側に凸面を向けた正メニスカスレンズL8と、両凹の負レンズL9で構成されており、1枚目の負レンズL6と2枚目の負レンズL9の曲率半径は、何れも同じ群内で隣接する正レンズ側がその反対側に比べて小さくなるように選定されている。

また、第3レンズ群G3は、媒質の異なる両凸正レンズと両凹負レンズを交互に配置してなる、3枚の両凸正レンズL10、L12及びL14と、2枚の両凹負レンズL11及びL13で構成され、物体側及び像側に両凸正レンズL10及びL14が配置されている。更に、隣接するこれら5枚のレンズL10～L14で、4組のレンズ対P2、P3、P4及びP5を形成して擬似的な3枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、第4レンズ群G4は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL15と、両凸の正レンズL16と、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL17とL18で構成され、レンズL15及びL16は1組のレンズ対P6を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、次のデータ3から明かなように、本実施例は、条件(1)、(2)、(3)及び(6)を、レンズ対P1～P6が条件(4)及び(5)を、また、深紫

外域と赤外域の物体側の波面収差結像位置も条件（7）を夫々満足している。

### データ 3

同焦45mm

深紫外域での収差補正範囲：248nm±5nm

NA0.9

WD=0.2

面番号	R D Y	T H I	媒質			
1	INFINITY	-4			条件 (4)	条件 (5)
2	2.73864	2.905691	石英	L1		
3	2.58448	1				
4	-2.33399	1	石英	L2		
5	2.74587	4.60997				
6	111.16539	2.171309	蛍石	L3		
7	-4.40895	0.364855			P1	0.0081 1.102
8	-3.99917	1	石英	L4		
9	12.05086	0.651716				
10	88.43996	3.353388	蛍石	L5		
11	-5.03227	0.1				
12	32.23164	1	石英	L6		
13	8.1197	0.591245				
14	12.03154	2.747198	蛍石	L7		
15	-11.83617	0.1				
16	-154.9676	2.377842	蛍石	L8		
17	-10.73268	0.649676				
18	-7.22798	1	石英	L9		
19	78.57585	0.1				



20	8.92775	3.974339	蛍石	L10			
21	-9.61008	0.311032			P2	0.0069	1.114
22	-8.62521	1	石英	L11			
23	7.11859	0.200013			P3	0.0044	1.021
24	7.27162	4.006314	蛍石	L12			
25	-7.45452	0.2			P4	0.0044	1.039
26	-7.17335	0.96	石英	L13			
27	7.36105	0.347197			P5	0.0077	1.169
28	8.60817	3.72229	蛍石	L14			
29	-7.10645	0.1					
30	9.71336	1	石英	L15			
31	3.61075	0.686382			P6	0.0153	1.318
32	4.75808	2.775991	蛍石	L16			
33	-12.71179	0.1					
34	3.89726	1.801922	蛍石	L17			
35	11.53447	0.1					
36	1.99349	1.750459	石英	L18			
37	104.07304	0.241172					

FL1 = -33.502

FL2 = 443.557

FL3 = 15.410

FL234 = 6.788

AF使用波長	248nmと各AF使用波長との物体側における波面収差ベスト位置での結像ズレ
670nm	-0.61 $\mu\text{m}$
785nm	+3.93 $\mu\text{m}$
900nm	-6.58 $\mu\text{m}$

Rmin1 = 8.1197

$$R_{\max 1}=12.03154$$

$$R_{\min 2}=-7.22798$$

$$R_{\max 2}=-10.73268$$

#### 第4実施例

第4実施例のレンズ構成は図7に示され、各収差は図8に示されている。図7から明かなように、本実施例の第1レンズ群G1は、像側から順に配置された、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL1と、負レンズL2と、正レンズL3と、負レンズL4と、正レンズL5で構成され、隣接する2枚のレンズL3及びL4で1組のレンズ対P1を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、全体として負のパワーをもっている。

また、第2レンズ群G2は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL6と両凸の正レンズL7で構成されており、負レンズL6の曲率半径は、同じ群内で隣接する正レンズL7側がその反対側に比べて小さくなるように選定されている。

また第3レンズ群G3は、4枚の両凸正レンズL8、L10、L12及びL14と、3枚の両凹負レンズL9、L11及びL13で構成され、全体として正のパワーをもっている。そして、両凸レンズと両凹レンズは媒質が異なり、交互に配置されている。また、物体側及び像側に両凸正レンズL8、L14が配置されている。更に、隣接する2枚のレンズL8、L9で1組のレンズ対P2を形成して、擬似的な2枚接合レンズを構成している。また、隣接する5枚のレンズL10～L14で4組のレンズ対P3、P4、P5及びP6を形成して擬似的な3枚接合レンズを構成している。

また、第4レンズ群G4は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL15と、両凸の正レンズL16と、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL17と、正レンズL18で構成され、レンズL15及びL16は1組のレンズ対P7を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、次のデータ4から明かなように、本実施例は、条件(1)、(2)、(

3) 及び (6) を、レンズ対 P 1 ~ P 7 が条件 (4) 及び (5) を、また、深紫外域と赤外域の物体側の波面収差結像位置も条件 (7) を夫々満足している。

#### データ 4

同焦45mm

深紫外域での収差補正範囲：248nm±5nm

NA0.9

WD=0.2

面番号	R D Y	T H I	媒質			
1	INFINITY	-4			条件 (4)	条件 (5)
2	2.81397	3.09206	石英	L1		
3	2.76385	1				
4	-2.31856	1.492274	石英	L2		
5	2.7277	4.262613				
6	-75.21087	2.180498	蛍石	L3		
7	-3.71239	0.42553			P1	0.0095 1.143
8	-3.24702	1	石英	L4		
9	23.08615	0.509333				
10	-136.3743	3.049067	蛍石	L5		
11	-4.95289	0.1				
12	59.70625	1	石英	L6		
13	8.70576	0.810219				
14	21.37872	2.373098	蛍石	L7		
15	-12.69628	0.1				
16	23.97133	3.159241	蛍石	L8		
17	-8.70394	0.314847			P2	0.0070 1.107
18	-7.85928	1	石英	L9		

19	24.51209	0.1					
20	8.67237	3.972724	萤石	L10			
21	-10.43664	0.333853			P3	0.0074	1.142
22	-9.14266	1	石英	L11			
23	7.13901	0.198711			P4	0.0044	1.020
24	7.2852	3.942702	萤石	L12			
25	-7.84279	0.193868			P5	0.0043	1.033
26	-7.59235	0.96	石英	L13			
27	7.6216	0.3644			P6	0.0081	1.186
28	9.04242	3.54172	萤石	L14			
29	-7.48584	0.1					
30	8.84686	1	石英	L15			
31	3.69613	0.705709			P7	0.0157	1.349
32	4.98561	2.714623	萤石	L16			
33	-13.30046	0.1					
34	3.89708	1.765252	萤石	L17			
35	8.91324	0.1					
36	1.90219	1.794209	石英	L18			
37	34.95039	0.24345					

FL1 = -23.968

FL2 = 77.984

FL3 = 18.192

FL234 = 7.088

Rmin = 8.70576

Rmax = 21.37872

AF使用波長	248nmと各AF使用波長との物体側における波面収差ベスト位置での結像ズレ
670nm	+3.90 $\mu\text{m}$
785nm	-0.55 $\mu\text{m}$
900nm	-6.24 $\mu\text{m}$

## 第5実施例

第5実施例のレンズ構成は図9に示され、各収差は図10に示されている。図9から明かなように、本実施例の第1レンズ群G1は、像側から順に配置された、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL1と、負レンズL2と、正レンズL3と、負レンズL4と、正レンズL5で構成され、隣接する3枚のレンズL3～L5で2組のレンズ対P1、P2を形成して擬似的な3枚接合レンズを構成し、全体として負のパワーをもっている。

また、第2レンズ群G2は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL6と、両凸の正レンズL7で構成されており、負レンズL6の曲率半径は、同じ群内で隣接する正レンズL7側がその反対側に比べて小さくなるように選定されている。

また第3レンズ群G3は、媒質の異なる両凸正レンズと両凹負レンズを交互に配置してなる、4枚の両凸正レンズL8、L10、L12及びL14と、3枚の両凹負レンズL9、L11及びL13で構成され、物体側及び像側に両凸正レンズL8、L14が配置されている。更に、隣接するこれら2枚のレンズL8及びL9で1組のレンズ対P3を形成して擬似的な2枚接合レンズを、これら5枚のレンズL10～L14で4組のレンズ対P4、P5、P6及びP7を形成して擬似的な3枚接合レンズを夫々構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、第4レンズ群G4は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL15と、両凸の正レンズL16と、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL17とL18で構成され、レンズL15及びL16は1組のレンズ対P8を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、次のデータ5から明かなように、本実施例は、条件(1)、(2)、(3)及び(6)を、レンズ対P1～P8が条件(4)及び(5)を、また、深

紫外域と赤外域の物体側の波面収差結像位置も条件（7）を夫々満足している。

# データ 5

同焦45mm

深紫外域での収差補正範囲：248nm±5nm

NA0.9

WD=0.2

面番号	R D Y	T H I	媒質				
1	INFINITY	-4				条件 (4)	条件 (5)
2	2.71159	2.905407	石英	L1			
3	2.78435	1					
4	-2.31651	1.412157	石英	L2			
5	2.7253	4.418894					
6	-18.87975	2.487348	蛍石	L3			
7	-3.62417	0.433359			P1	0.0096	1.135
8	-3.19218	1	石英	L4			
9	-61.99509	0.25793			P2	0.0057	0.981
10	-60.81569	2.678607	蛍石	L5			
11	-5.47827	0.1					
12	220.57961	1	石英	L6			
13	9.08685	0.879978					
14	31.41704	2.225112	蛍石	L7			
15	-13.39864	0.1					
16	14.01766	3.54376	蛍石	L8			
17	-9.08325	0.214654			P3	0.0048	1.035
18	-8.77543	1	石英	L9			
19	15.73139	0.1					

20	7.76576	4.277461	萤石	L10			
21	-10.30516	0.393835			P4	0.0088	1.201
22	-8.57884	1	石英	L11			
23	7.171	0.200263			P5	0.0045	1.021
24	7.32009	3.935647	萤石	L12			
25	-7.89289	0.200186			P6	0.0044	1.040
26	-7.59194	0.96	石英	L13			
27	8.07009	0.313274			P7	0.0070	1.131
28	9.12468	3.384142	萤石	L14			
29	-8.12096	0.1					
30	8.60096	1	石英	L15			
31	3.67872	0.702655			P8	0.0156	1.343
32	4.94159	2.700085	萤石	L16			
33	-14.70578	0.1					
34	3.73742	1.791677	萤石	L17			
35	7.85852	0.1					
36	1.84237	1.836756	石英	L18			
37	17.62537	0.246814					

FL1 = -20.6369

FL2 = 1845.95

FL3 = 17.640

FL234 = 7.377

Rmin = 9.08685

Rmax = 31.41704

AF使用波長	248nmと各AF使用波長との物体側における波面収差ベスト位置での結像ズレ
670nm	+4.22 $\mu\text{m}$
785nm	-0.20 $\mu\text{m}$
900nm	-6.03 $\mu\text{m}$

## 第6実施例

第6実施例のレンズ構成は図11に示され、各収差は図12に示されている。図11から明かなように、本実施例の第1レンズ群G1は、像側から順に配置された、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL1と、負レンズL2と、正レンズL3と、負レンズL4と、正レンズL5で構成され、隣接する3枚のレンズL3～L5で2組のレンズ対P1、P2を形成して擬似的な3枚接合レンズを構成し、全体として負のパワーをもっている。

また、第2レンズ群G2は、両凸の正レンズL6と、像側に凹面を向けた負メニスカスレンズL7で構成されており、負レンズL7の曲率半径は、同じ群内で隣接する正レンズL6側がその反対側に比べて小さくなるように選定されている。

また、第3レンズ群G3は、媒質の異なる両凸正レンズと両凹負レンズを交互に配置してなる、4枚の両凸正レンズL8、L10、L12及びL14と、3枚の両凹負レンズL9、L11及びL13で構成され、物体側及び像側に両凸正レンズL8及びL14が配置されている。更に、隣接する7枚のレンズL8～L14で、6組のレンズ対P3、P4、P5、P6、P7及びP8を形成して擬似的な3枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、第4レンズ群G4は、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズL15と、両凸の正レンズL16と像側に凸面を向けた正メニスカスレンズL17とL18で構成され、1組のレンズ対P9を形成して擬似的な2枚接合レンズを構成し、全体として正のパワーをもっている。

また、次のデータ6から明かなように、本実施例は、条件(1)、(2)、(3)及び(6)を、レンズ対P1～P9が条件(4)及び(5)を、また、深紫外域と赤外域の物体側の波面収差結像位置も条件(7)を夫々満足している。



## データ 6

同焦45mm

深紫外域での収差補正範囲：248nm±5nm

NA0.9

WD=0.2

面番号	R D Y	T H I	媒質				
1	INFINITY	-4				条件 (4)	条件 (5)
2	2.40698	2.481247	石英	L1			
3	2.4729	1					
4	-2.06668	1.00205	石英	L2			
5	2.43139	5.396129					
6	20.17433	2.407156	蛍石	L3			
7	-5.53323	0.259513			P1	0.0058	1.017
8	-5.44118	1.24444	石英	L4			
9	8.91162	0.401085			P2	0.0089	1.357
10	12.09094	3.156645	蛍石	L5			
11	-7	0.1					
12	61.22577	2.241903	蛍石	L6			
13	-12.63263	0.757738					
14	-7.52366	1	石英	L7			
15	-31.66303	0.1					
16	12.668	3.389652	蛍石	L8			
17	-11.03464	0.1			P3	0.0022	0.969
18	-11.38305	1	石英	L9			
19	11.02999	0.1			P4	0.0022	0.682
20	7.52787	4.19599	蛍石	L10			
21	-10.19725	0.484353			P5	0.0108	1.293

22	-7.8871	1	石英	L11			
23	7.89473	0.1			P6	0.0022	0.951
24	7.50757	3.837795	蛍石	L12			
25	-8.29073	0.200736			P7	0.0045	1.036
26	-8.00414	0.96	石英	L13			
27	10.08674	0.20286			P8	0.0045	1.017
28	10.2603	3.160175	蛍石	L14			
29	-9.13166	0.1					
30	8.6418	1	石英	L15			
31	3.72211	0.672984			P9	0.0150	1.304
32	4.85348	2.69256	蛍石	L16			
33	-21.05717	0.1					
34	3.59888	1.866016	蛍石	L17			
35	7.37659	0.1					
36	1.77692	1.931898	石英	L18			
37	7.15061	0.257076					

FL1 = -32.892

FL2 = -211.743

FL3 = 18.024

FL234 = 6.493

Rmin = -7.52366

Rmax = -12.63263

AF使用波長	248nmと各AF使用波長との物体側における波面収差ベスト位置での結像ズレ
670nm	+3.31 $\mu\text{m}$
785nm	-1.26 $\mu\text{m}$
900nm	-7.25 $\mu\text{m}$

以上の説明から明らかなように、本発明によれば、接合レンズを使わずに色収差を補正でき、且つ半導体の高集積化や光記録媒体の大容量化に伴う微細化

に対応すべく、分解能を飛躍的に向上させ、またAF可能とすることで瞬時にフォーカスでき、製造誤差に対しても優れた結像性能を維持する高NAの深紫外対物レンズを提供することができる。

What is claimed is

1. すべてのレンズが単レンズで構成されていて、

像側から順に配置された、

像側に凸面を向けた正メニスカスレンズと少なくとも各2枚の負レンズと正レンズを有し、全体として負のパワーを持つ第1レンズ群と、

負レンズと正レンズで構成され、負レンズの曲率半径は、正レンズと対面する側がその反対側よりも小さい第2レンズ群と、

媒質の異なる両凸正レンズと両凹負レンズからなり、物体側及び像側に前記両凸正レンズが配置され、全体として正のパワーを持つ第3レンズ群と、

負メニスカスレンズと少なくとも1枚の正メニスカスレンズを有する全体として正のパワーを持つ第4レンズ群と、

で構成された対物レンズであって、

前記第2レンズ群中の負レンズにおいて、隣接する正レンズ側の曲率半径を  $R_{\min}$ 、正レンズと反対側の曲率半径を  $R_{\max}$  としたとき、下記条件を満足する開口数 0.7 以上の対物レンズ。

$$0 < |R_{\min}/R_{\max}| < 0.5$$

2. 前記第2レンズ群の焦点距離を  $FL2(mm)$ 、前記第3レンズ群の焦点距離を  $FL3(mm)$  としたとき、下記条件を満足する請求項1に記載の対物レンズ。

$$1 < |FL2/FL3|$$

3. 前記第1レンズ群の焦点距離を  $FL1(mm)$ 、前記第2レンズ群から第4レンズ群までの合成焦点距離を  $FL234(mm)$  としたとき、下記条件を満足する請求項1に記載の対物レンズ。

$$-15 < FL1/FL234 < -1$$

4. 石英と蛍石で構成されている請求項1に記載の対物レンズ。

5. 第1, 第3及び第4レンズ群は、媒質の異なる正レンズと負レンズとの間に空気間隔を設け、且つ対物レンズの同焦距離を $L(\text{mm})$ 、前記空気間隔を $d(\text{mm})$ 、該空気間隔を挟んで向かい合う正パワーの面の曲率半径を $R_p$ 、負パワーの面の曲率半径を $R_n$ としたとき、下記条件を満足させるようにしたレンズ対を少なくとも1組有している請求項1に記載の対物レンズ。

$$d/L < 0.025$$

$$0.58 < R_p/R_n < 1.73$$

6. 媒質の異なる負レンズと正レンズを空気間隔をもって配置することにより構成された少なくとも一つのレンズ対は、負レンズが石英、正レンズが蛍石で構成されている請求項1乃至5の何れかに記載の対物レンズ。

7. 第1群の少なくとも1枚の凹レンズにおいて、像側の曲率半径を $R_i$ 、物体側の曲率半径を $R_o$ としたとき、下記条件を満足する請求項1乃至5の何れかに記載の対物レンズ。

$$R_i < R_o$$

8. 深紫外域での物体側結像位置を $DUV_{fp}$ 、赤外域の波長の物体結像位置を $IR_{fp}$ とすると、下記条件を満足する請求項1乃至5の何れかに記載の対物レンズ。

$$| DUV_{fp} - IR_{fp} | \leq 12 \mu m$$

## ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

すべてのレンズが単レンズで構成されていて、像側から順に配置された、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズと各2枚の負レンズと正レンズを有し全体として負のパワーを持つ第1レンズ群と、負レンズと正レンズで構成されていて負レンズの曲率半径は正レンズと隣接する側がその反対側よりも小さい第2レンズ群と、媒質の異なる4つの両凸正レンズと3つの両凹負レンズからなり且つ物体側及び像側に2つの両凸正レンズが夫々配置され全体として正のパワーを持つ第3レンズ群G3と、負メニスカスレンズと正レンズと正メニスカスレンズと正レンズを有する全体として正のパワーを持つ第4レンズ群とで構成され、0.7以上の開口数を有し、上記第2レンズ群中の負レンズにおいて、隣接する正レンズ側の曲率半径を $R_{\min}$ 、その正レンズと反対側の曲率半径を $R_{\max}$ としたとき、 $0 < |R_{\min}/R_{\max}| < 0.5$  なる条件を満足するように構成されている。